

Nederlandse organisatie  
voor toegepast  
natuurwetenschappelijk  
onderzoek



Fysisch en Elektronisch  
Laboratorium TNO



AD-A217 914

DTIC FILE COPY

DISTRIBUTION STATEMENT A  
Approved for public release;  
Distribution Unlimited

DTIC  
ELECTE  
FEB 09 1990  
S E D

90 02 09 112

Nederlandse organisatie  
voor toegepast  
natuurwetenschappelijk  
onderzoek



Fysisch en Elektronisch  
Laboratorium TNO



TNO-rapport

Postbus 96864  
2509 JG 's-Gravenhage  
Oude Waalsdorperweg 63  
's-Gravenhage

Telefoon 070 - 26 42 21

rapport no.  
FEL-89-B252

exemplaar no.

titel

07

De rol van de geïntegreerde optica in  
de optische communicatie

Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt  
door middel van druk, fotokopie, microfilm  
of op welke andere wijze dan ook, zonder  
voorafgaande toestemming van TNO.  
Het ter inzage geven van het TNO-rapport  
aan direct belanghebbenden is toegestaan

auteur(s):

Drs. J.L. Joppe

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-  
opdrachten TNO', dan wel de betreffende  
terzake tussen partijen gesloten  
overeenkomst.

© TNO

rubricering

titel : ongerubriceerd

samenvatting : ongerubriceerd

rapport : ongerubriceerd

oplage : 22

aantal bladzijden : 44 /

aantal bijlagen : --

datum : september 1989

Accession For	
NTIS GRA&I	<input checked="" type="checkbox"/>
DTIC TAB	<input type="checkbox"/>
Unannounced	<input type="checkbox"/>
Justification	
By	
Distribution/	
Availability Codes	
Dist	Avail and/or Special
A-1	



DTIC  
ELECTE  
FEB 09 1990  
S E D

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;  
Distribution Unlimited



rapport no. : FEL-89-B252  
titel : De rol van de geïntegreerde optica in de optische  
communicatie  
  
auteur(s) : Drs. J.L. Joppe  
instituut : Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO  
  
datum : september 1989  
no. in iwp '89 : 715.4

=====

## SAMENVATTING

Optische communicatie met behulp van glasvezels heeft de afgelopen jaren een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Een wereldwijde en groots opgezette onderzoeksinspanning heeft ervoor gezorgd, dat optische communicatiesystemen zich definitief hebben ontpopt tot een uniek en ongeëvenaard middel voor de overdracht van grote hoeveelheden informatie. Inmiddels zijn al vele systemen commercieel verkrijgbaar en toegepast, zoals een transatlantische optische kabel met een capaciteit van 40.000 telefoongesprekken. In de toekomst komt hier een geheel nieuwe toepassing bij, nl. de introductie in het locale net. Naar verwachting zal aan het einde van deze eeuw de abonnee aangesloten kunnen worden op een breedbandig optisch communicatienet (B-ISDN).

Parallel aan deze ontwikkelingen ontstond de geïntegreerde optica. Dit is een tak van de optica die probeert verschillende optische componenten in een planaire structuur te miniaturiseren en te integreren. In de steeds complexer wordende systemen voor optische communicatie blijkt de geïntegreerde optica op vele punten een duidelijke vereenvoudiging aan te kunnen brengen. Bovendien blijkt het mogelijk geheel nieuwe functies te vervullen. Het is daarom te verwachten dat geïntegreerd optische componenten een steeds belangrijker functie in (laboratorium) systemen zullen krijgen, waarna commerciële toepassingen niet uit kunnen blijven.

In dit rapport zal de ontwikkeling van optische communicatiesystemen worden beschreven en zullen mogelijke toepassingen van geïntegreerd optische componenten worden aangegeven.

report no. : FEL-89-B252  
title : Application of integrated optical components in  
optical fibre communication  
  
author(s) : Drs. J.L. Joppe  
institute : TNO Physics and Electronics Laboratory  
  
date : September 1989  
no. in pow '89 : 715.4

-----

## ABSTRACT

The advance in optical fiber communication has been tremendous during the last few years. A worldwide and very ambitious research effort has accomplished that optical communication has become an unique and unparalleled way to transmit large amounts of information. At this time many systems are available and used in practice. An example is a just installed transatlantic cable with a capacity of 40,000 telephone calls. In the near future there will be a new application of optical communication in the local distribution network. It is expected that at the end of this century the subscriber will be connected with a broadband integrated services digital network (B-ISDN).

Synchronous with these developments integrated optics originated. Integrated optics is a branch of optics which tries to integrate and miniaturise optical components. In this way optical communication systems can be simplified and improved considerably. Moreover it is possible to fulfill completely new functions. Therefore it is expected that integrated optical components will become more and more important in research optical systems. After this stage commercial applications will be very likely.

In this report the developments in optical fiber communication systems are described. Possible application of integrated optical components are given.

SAMENVATTING	1	
SUMMARY	3	
INHOUD	5	
1	ENKELE BEGRIPPEN UIT DE OPTISCHE COMMUNICATIE	7
1.1	Inleiding	7
1.2	Dispersie	7
1.3	Optische demping	11
2	LABORATORIUM SYSTEMEN	13
2.1	Eerste generatie optische communicatie	13
2.2	Tweede generatie optische communicatie	14
2.3	Derde generatie optische communicatie	15
2.3.1	Begrenzingsen	15
2.3.2	Singlemode lasers	16
2.3.3	Chirp en externe modulatie	16
2.3.4	Het systeem	18
2.4	Wavelength division multiplexing	19
2.5	Dispersion-shifted en dispersion-flattened fibers	20
2.6	Pre-chirping van het lasersignaal	21
3	COHERENTE OPTISCHE COMMUNICATIE	22
3.1	Coherente communicatie	22
3.2	Coherente detectie	23
3.3	Modulatieschema's	24
3.3.1	Gevoeligheid	24
3.3.2	Lijnbreedte van de laser	26
3.4	Phase-diversity detectie	26
3.5	Polarisatie controle	27
3.6	Electronische compensatie van de fiberdispersie	28
3.7	Frequency division multiplexing	29

3.8	Lasers voor coherente detectie	29
3.8.1	Monolithische (externe cavity) lasers	30
3.8.2	Hybrid geïntegreerde externe cavity lasers	31
3.8.3	Bulk externe cavity lasers	32
4	COMMERCIELE SYSTEMEN	34
4.1	Inleiding	34
4.2	Interoffice-systemen	34
4.3	Intercity-systemen	35
4.4	Transatlantische systemen	35
4.5	Local Area Networks (LAN)	35
4.6	ISDN en B-ISDN	36
5	GEINTEGREERDE OPTICA	37
5.1	Smalbandige lasers	37
5.2	Snelle modulatoren	37
5.3	Polarisatiedraaiers	38
5.4	Optische isolatoren	38
5.5	Ontvanger voor coherente detectie	38
5.6	Matrix schakelaars	39
5.7	Conclusie	40



## 1 ENKELE BEGRIPPEN UIT DE OPTISCHE COMMUNICATIE

In dit hoofdstuk zullen enkele basisbegrippen uit de optische communicatie naar voren komen. Deze begrippen zullen in volgende hoofdstukken veelvuldig terugkeren bij de beschrijvingen van de systemen.

### 1.1 Inleiding

Optische communicatie is een techniek die tracht informatie over te dragen d.m.v. een optisch signaal. De grote voordelen van deze techniek zijn de bijna onbegrensde bandbreedte en de zeer lage demping van de transmissielijn, de glasvezel. De glasvezel is verder aantrekkelijk door zijn lange levensduur, compacte vorm en lage produktiekosten. Bovendien is de glasvezel erg moeilijk af te luisteren, is hij moeilijk van buiten af te storen en is hij ongevoelig voor EMI en EMP. Dit maakt de glasvezel erg geschikt voor computerlinks of militaire toepassingen.

Een systeem voor optische communicatie bestaat in essentie uit een lichtbron (een halfgeleider-laser of een LED), een transmissielijn (de glasvezel) en een detector (PIN-diode of Avalanche photodiode). De eigenschappen van deze componenten die uiteindelijk de kwaliteit van het systeem bepalen zijn o.a. de spectrale lijnbreedte van de laser, de gevoeligheid van de detector en de verliezen en dispersie in de glasvezel. De kwaliteit van het systeem wordt i.h.a. aangeduid door het bitrate-maximale afstand product.

### 1.2 Dispersie

Dispersie is een eigenschap van de glasvezel die in hoge mate de capaciteit van het optische systeem bepaalt. Dispersie veroorzaakt een verbreding van de optische puls als deze door de glasvezel propageert. Dit beperkt de maximale bitrate.

In een multimode glasvezel wordt de dispersie voornamelijk bepaald door de verschillende paden (modes) die het licht in de glasvezel kan kiezen: mode dispersie (zie fig. 1.2.1).

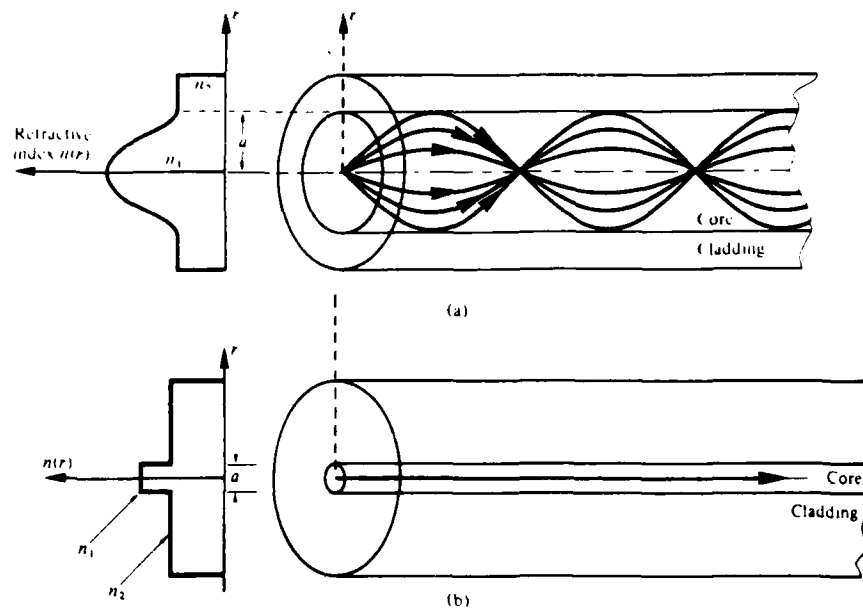


Fig. 1.2.1. Het brekingsindex-profiel en het stralenbeeld van een multimode graded-index fiber (a) en een singlemode step-index fiber (b) [Senior (1985)].

Elke mode heeft een andere propagatie-snelheid waardoor de pulsverbreding optreedt. Na lange afstanden wordt het zo onmogelijk pulsen te onderscheiden.

Voor een multimode graded-index fiber wordt het bitrate-afstand product gegeven door [Gloge (1973)] :

$$B.L \leq 2c/n\Delta^2 \approx 2 \text{ Gb/s.km} \quad (1.2.1)$$

B = bitrate  
L = maximale afstand  
c = lichtsnelheid  
n = brekingsindex van de kern  
 $\Delta$  = contrast in de fiber

Dit is al aanzienlijk beter dan de prestaties van een COAX-kabel. Een nog veel hogere prestatie wordt geleverd door de singlemode fiber. Dit is een fiber waarin slechts één mode kan propageren. De dispersie wordt in dit geval voornamelijk bepaald door de materiaal dispersie: de golflengte-afhankelijkheid van de brekingsindex. Elke golflengte propageert dus met een verschillende snelheid. Zo bepaalt dus uiteindelijk de lijnbreedte van de bron de kwaliteit van het systeem. Voor een singlemode stepindex fiber wordt het bitrate-afstand gegeven door [Marcuse (1981)]:

$$B.L \leq 1/4D\sigma_1 \quad (1.2.2)$$

D = dispersie (ps/km.nm)  
 $\sigma_1$  = lijnbreedte van de bron (nm)

De materiaal dispersie vertoont een minimum bij een golflengte van  $1.3 \mu\text{m}$  (zie fig. 1.2.2). Dit maakt deze golflengte aantrekkelijk voor optische communicatie.

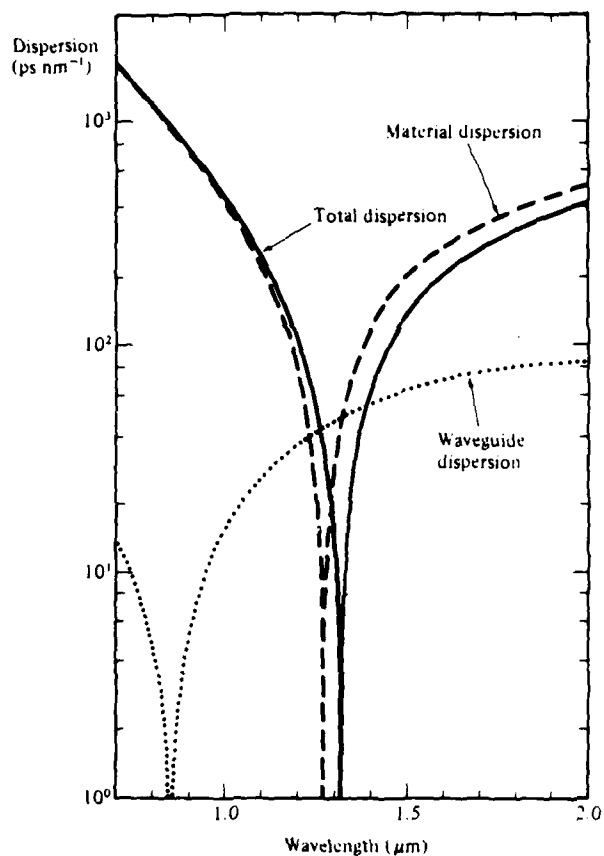


Fig. 1.2.2. De dispersie van een 11 km lange singlemode step-index fiber als functie van de golflengte [Yamada (1978)]

Een tweede bijdrage aan de dispersie is de waveguide dispersie (zie 2.5). Dit effect zorgt in een normale singlemode fiber slechts voor een kleine verschuiving van het dispersie minimum, maar het kan in fibers met een complexer brekingsindexprofiel gebruikt worden om de dispersiekromme te modificeren. Geavanceerde glasvezels als de dispersion-shifted en dispersion-flattened fiber maken hier gebruik van.

## 1.3 Optische demping

Naast de dispersie is de demping van het optische signaal de meest beperkende factor in systemen voor optische communicatie. De maximale afstand die zonder versterker overbrugd kan worden wordt gegeven door :

$$L = (10/A) \cdot \log(P_b/P_d) \quad (1.3.1)$$

$P_b$  = vermogen van de lichtbron

$P_d$  = minimaal te detecteren vermogen

$A$  = demping in dB/km

Aan deze formule is te zien dat  $L$  slechts logaritmisch afhankelijk is van het vermogen van de lichtbron. Het is duidelijk dat het belangrijker is dat de demping zo laag mogelijk is. In fig. 1.3.1. zijn de dempingsmechanismen aangegeven.

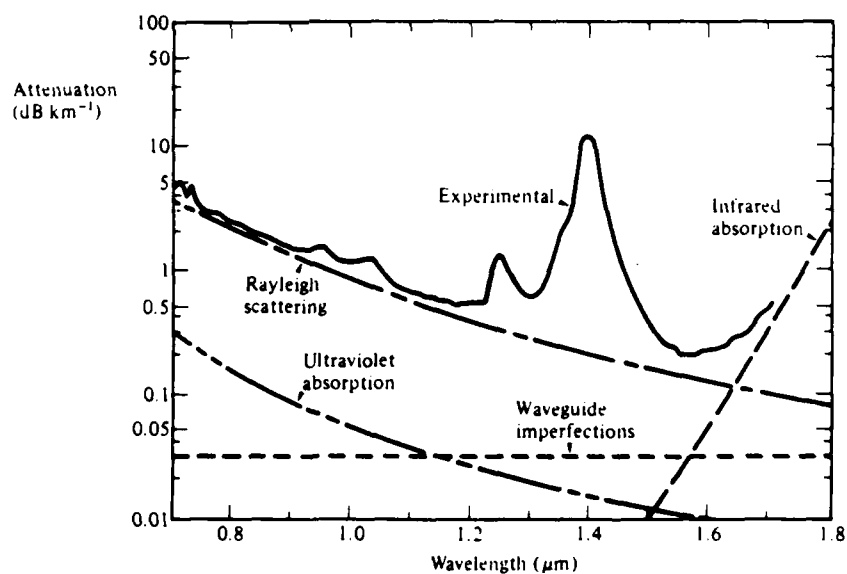


Fig. 1.3.1. Dempingsmechanismen in een singlemode step-index glasvezel.  
[Miya (1979)]

Een theoretische ondergrens voor de demping wordt bepaald door de Rayleigh verstrooiing aan dichtheidsvariaties in het materiaal en door infrarood absorptie, die veroorzaakt wordt door interactie met bepaalde molecuultrillingen. In de praktijk ontstaat echter ook een brede absorptieband rond  $1.4 \mu\text{m}$ . Deze absorptie treedt op doordat OH-ionen tijdens het fabricageproces in de fiber zijn binnengedrongen. Het is extreem moeilijk deze nog verder terug te dringen.

Het resultaat is dat er rond  $1.55 \mu\text{m}$  een band ontstaat van minimale demping. In de hieronder te beschrijven systemen zal deze golflengte, samen met de golflengte van minimale dispersie, een belangrijke rol spelen. In de dempingslimiet (zie formule 1.3.1) speelt de bitrate slechts een beperkte rol. De gevoeligheid van de detector is grofweg lineair afhankelijk van de bitrate hetgeen logaritmisch doorwerkt in de maximaal te overbruggen afstand.

## 2 LABORATORIUM SYSTEMEN

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de laboratorium systemen die reeds gerealiseerd zijn (in historische volgorde). Er zal ingegaan worden op de systeemeigenschappen en de kenmerken van de componenten afzonderlijk.

## 2.1 Eerste generatie optische communicatie

Enige jaren na de uitvinding van de halfgeleider-laser werd het duidelijk dat optische communicatie met lasers en glasvezels technisch mogelijk moest zijn [Kao (1966)]. Het materiaal waar de eerste halfgeleider-lasers van werden gefabriceerd was GaAs.

Nadat problemen als de levensduur en koeling van de lasers waren opgelost ontstond er een systeem wat men nu de eerste generatie van optische communicatie is gaan noemen. Het bestaat uit een laser, die aan een multimode graded-index fiber is gekoppeld.

De laser die in dit systeem gebruikt wordt is een multimode Fabry-Perot laser. Het is niet de lijnbreedte van de laser die de uiterste grenzen van dit systeem bepaalt, maar de mode-dispersie in de glasvezel.

## SYSTEEM :

- .Laser : multimode Fabry-Perot (GaAs/AlGaAs)
- .Golflengte : 0.85  $\mu\text{m}$
- .Glasvezel : multimode graded-index
- .Detector : pin-diode Si
- .Prestatie : B.L < 2 Gb/sec.km [Cohen (1978)]

Het succes van dit systeem wordt het beste gedemonstreerd door het feit dat het commercieel is toegepast in een systeem voor intercity telefoon-verkeer in de Verenigde Staten. Het zgn. AT&T FT3C net werkt op 90 Mb/s met 10 km repeater atstand [Stauffer (1983)].

## 2.2 Tweede generatie optische communicatie

Door de hoge demping en dispersie bij  $0.85 \mu\text{m}$  was het duidelijk dat een systeem bij een hogere golflengte veel beter zou kunnen werken. De techniek voor het fabriceren van de benodigde componenten zoals lasers en de-tectoren moest echter nog ontwikkeld worden.

In het quaternaire halfgeleider-systeem InP/InGaAsP bleek het mogelijk de bandgap, die de golflengte van het component bepaalt, te variëren door de mengverhouding van de vier elementen te veranderen. Zo is het in principe mogelijk de golflengte van  $1.0 \mu\text{m}$  tot  $1.7 \mu\text{m}$  te variëren. De lasers die van dit halfgeleider materiaal werden gemaakt waren nog steeds van het multimode Fabry-Perot type. Met een lijnbreedte van deze lasers van ongeveer  $1 \text{ nm}$  is de dispersie van belang. Daarom koos men de golflengte rond het dispersie-minimum van  $1.3 \mu\text{m}$ .

Parallel aan de ontwikkeling van de InP groeitechnieken nam de toepassing van de singlemode glasvezel sterk toe. Problemen met connectors tussen fibers en inkoppeling van de bronnen in de fibers werden opgelost. De singlemode fiber en de multimode InP-laser werden gecombineerd tot de tweede generatie optische communicatie systemen.

### SYSTEEM:

.Laser	: multimode Fabry-Perot (InP/InGaAsP)
.Golflengte	: $1.3 \mu\text{m}$
.Glasvezel	: singlemode step-index
.Detector	: Ge/InGaAs
.Prestatie	: $B.L \leq 125 \text{ Gb/sec.km}$ (indicatie)

De prestatie van een tweede generatie systeem wordt mede bepaalt door het feit dat de lasergolflengte niet exact op het dispersie minimum gekozen kan worden wegens onnauwkeurigheden in de fabricage methoden. Een praktische realisatie van een tweede generatiesysteem werd gedemonstreerd door Yamada (1981). In dit experiment werd  $2 \text{ Gb/s}$  over  $44 \text{ km}$  verzonden. Ook zijn er reeds commerciële  $1.3 \mu\text{m}$  systemen in gebruik.



Naast een systeem met een laser, bestaan er ook wel systemen die gebruik maken van een 'Light Emitting Diode' (LED). Door een gedeelte van het spectrum uit te filteren is het gelukt om 560 Mb/s over 15 km te verzenden [Stern (1986)]. Hoewel de prestaties van een op LED's gebaseerd optisch communicatienet nooit die van een systeem met lasers zullen benaderen, heeft de LED enkele belangrijke voordelen. Naast het feit dat een LED goedkoper is dan een laser, is de LED ook veel beter bestand tegen hoge temperaturen (tot 200 °C tegen 60 °C voor de laser). Bovendien is de levensduur van de LED extreem hoog: tot 100 jaar. Daarom zal de LED voornamelijk toegepast worden in systemen die over korte afstanden en onder extreme omstandigheden werken.

### 2.3 Derde generatie optische communicatie

#### 2.3.1. Begrenzungen

In een tweede generatie systeem wordt niet optimaal gebruik gemaakt van de minimale demping van de glasvezel. Dit punt ligt immers bij 1.55  $\mu\text{m}$ . Het voordeel van een tweede generatie systeem is echter dat de eisen voor de spectrale eigenschappen van de laser niet erg streng zijn.

Door het beschikbaar komen van singlemode lasers in de jaren tachtig werd het mogelijk om de prestaties van het systeem bij 1.3  $\mu\text{m}$  te verbeteren. Dit was mogelijk door de golflengte naar 1.55  $\mu\text{m}$  te verschuiven. De dempingslimiet werd ongeveer een factor twee verbeterd door de lagere demping bij 1.55  $\mu\text{m}$  ( $\sim 0.2$  dB/km tegen  $\sim 0.4$  dB/km bij 1.3  $\mu\text{m}$ ). Het feit dat de dispersie bij 1.55  $\mu\text{m}$  relatief hoog is (15 psec/km.nm) wordt gecompenseerd door de veel smallere lijnbreedte van de singlemode laser.

Echter, de dispersielimiet valt niet oneindig te verschuiven. Bij hoge bitrate's wordt de dispersie namelijk niet meer door de interne lijnbreedte van de laser bepaald, maar door de bandbreedte van het gemoduleerde signaal.

$$\sigma \approx \lambda^2 B / 2c \quad (2.3.1)$$

Samen met (1.2.2.) ( $\sigma_1 = \sigma$ ) levert dit de ultieme grens op voor derde generatie systemen, die gebruik maken van singlemode step-index fibers [Henry, P.S. (1985)].

$$B^2 \cdot L \leq c / 2D\lambda^2 \approx 4200 \text{ (Gb/s)}^2 \cdot \text{km} \quad (2.3.2)$$

#### 2.3.2. Singlemode lasers

Singlemode lasers zijn lasers die een veel kleinere lijnbreedte hebben dan de multimode Fabry-Perot lasers. Dit wordt bereikt door in de laser een frequentie-selectief element, bijv. een tralie aan te brengen. Dit (op een holografische wijze aangebrachte) tralie selecteert één mode uit het totale spectrum.

Men onderscheidt de zgn. DBR (Distributed Bragg Reflector) laser waar het tralie op de actieve laag is aangebracht en de DFB (Distributed Feedback) laser waar het tralie buiten de actieve laag is aangebracht. Een typische lijnbreedte van een dergelijke laser is 50 Mhz. Dit is voldoende laag voor breedbandige optische communicatie.

Een ander soort singlemode laser is de 'Cleaved Coupled Cavity' ( $C^3$ ) laser [Tsang (1983)]. Dit is een laser waar twee verschillende Fabry-Perot lasers vlak tegen elkaar zijn geplaatst. De wisselwerking tussen de modespectra zorgt ervoor dat er één mode wordt geselecteerd.

#### 2.3.3. Chirp en externe modulatie

Bij lage bitrates is het mogelijk de output van de laser direct te moduleren door de stroom door de laser te variëren. Bij hoge bitrates (boven ~Ghz) kan dit echter problematisch worden. Doordat de brekings-index in de actieve laag van een halfgeleider-laser afhankelijk is van de carrier-density, varieert de frequentie van het uitgezonden licht t.g.v. de directe modulatie van de laser. Dit levert een lijnverbreding op die men chirp noemt. Deze chirp kan vele Ghz.'n bedragen, meer dan de bitrate, en zo de kwaliteit van het systeem verlagen.

Daarom heeft men gezocht naar manieren om het optische signaal extern, buiten de laser, te moduleren. Dit is het punt waar de geïntegreerde optica voor het eerst haar intrede doet in de techniek van de optische communicatie.

Geïntegreerde optica is een tak van de optica, die probeert verschillende optische functies in een planaire structuur te integreren. Dit heeft als voordeel dat optische componenten geminiaturiseerd en samengevoegd kunnen worden tot een compact en rigide geheel. Een populair materiaal voor het vervaardigen van dergelijke componenten is  $\text{LiNbO}_3$ . Dit is een electro-optisch materiaal d.w.z. de brekingsindex verandert o.i.v. een aangelegd elektrisch veld. In fig. 2.3.1. wordt een amplitude-modulator getoond, die verbonden is met glasvezels [Korotky (1983)]. De electrodes kunnen het ingangssignaal verdelen over de twee uitgaande glasvezels, zodat de amplitude van één kanaal gemoduleerd wordt.

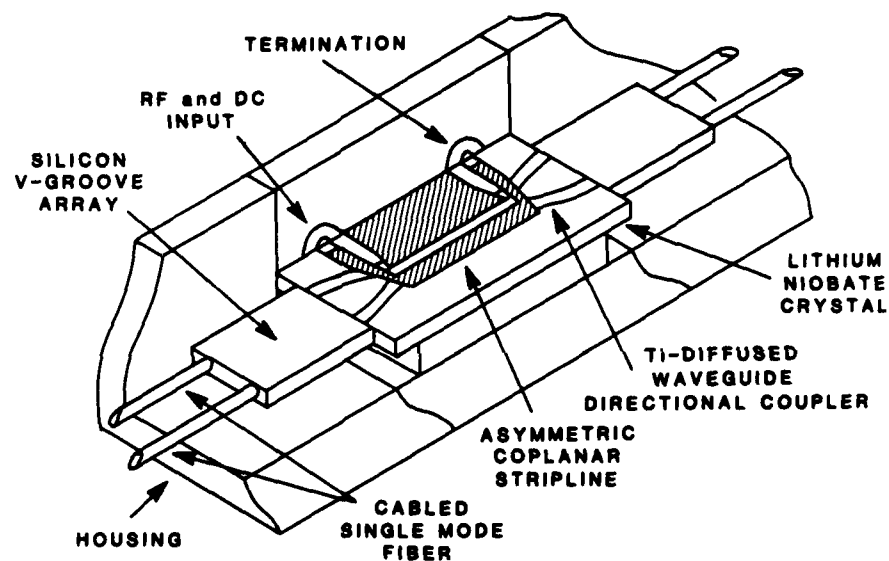


Fig. 2.3.1. Electro-optische modulator in  $\text{LiNbO}_3$  [Korotky (1983)]

Naast het voordeel van het ontbreken van chirp bij een extern gemoduleerde laser is er het nadeel van koppelverliezen tussen de verschillende componenten (laser-fiber-modulator-fiber). Dit verlies bedraagt enkele dB's. Hierdoor wordt de transmissieafstand enigszins beperkt. De geïntegreerde optica is bij uitstek geschikt om de componenten 'laser' en 'modulator' hybrid of monolithisch te integreren [Yamaguchi (1987)]. Electro-optische polymeren zouden hier een rol in kunnen spelen.

#### 2.3.4. Het systeem

Samenvattend ziet een derde generatie systeem er als volgt uit.

##### SYSTEEM:

- .Laser : singlemode DBR, DFB,  $C^3$  (InGaAsP)
- .Externe modulator :  $LiNbO_3$  electro-optisch
- .Glasvezel : singlemode step-index
- .Detector : InGaAs (Avalanche Photodiode)
- .Prestatie :  $B^2 \cdot L \leq 4200 \text{ (Gb/s)}^2 \cdot \text{km}$

Bovenstaande configuratie is door Gnauck (1987) gebruikt om 8 Gb/s over 70 km te verzenden. Hiermee werden de grenzen van derde generatie optische systemen bereikt.

N.B. deze experimentele waarde ligt zelfs iets boven de theoretische bovengrens. Dit komt omdat bij de theorie een conventie is gebruikt voor het kunnen onderscheiden van de bits. Men kan deze eis wel versoepelen, maar dit gaat onherroepelijk ten koste van het aantal fouten in de detectie, de zgn. Bit Error Rate (BER). Elk systeem moet dit getal vermelden en normaal wordt geëist dat dit kleiner is dan  $10^{-9}$ .

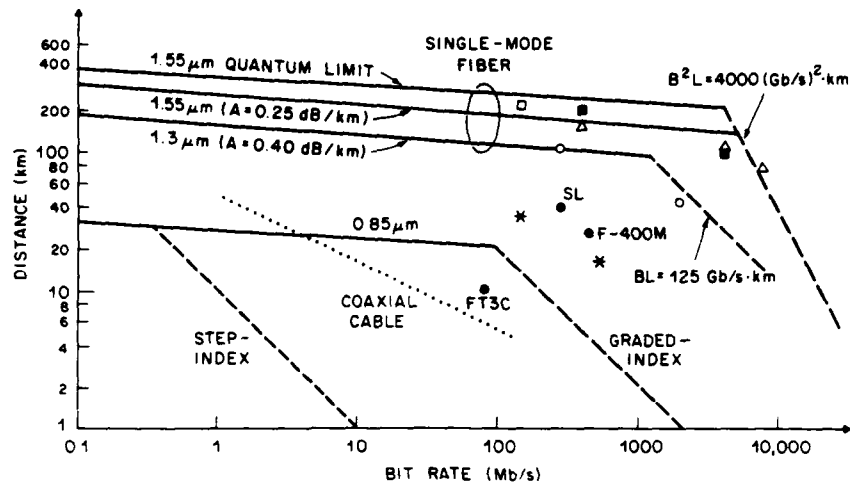


Fig. 2.3.2 Bitrate tegen de maximale afstand voor verschillende generaties van optische communicatie. De dempingslimiet (getrokken lijnen) en de dispersielimiet (gestippelde lijnen) geven de begrenzingen aan.

- O  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$
- \*  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  LED
- $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  DFB-laser
- △  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  C-laser
- commerciële systemen

De quantum limiet correspondeert met een ideale coherente ontvanger (homodyne PSK, zie hoofdstuk 3) [Miller (1988)].

#### 2.4 Wavelength division multiplexing

Het experiment van Gnauck toonde aan dat de grenzen van één-kanaals optische communicatie bereikt waren. Tenminste, met de configuratie zoals boven beschreven. Er zijn echter nog enkele speciale mogelijkheden om de informatiedichtheid in de glasvezel verder op te voeren.

Eén daarvan is het idee om meerdere golflengten door dezelfde glasvezel te sturen. Het bestaat uit het samenvoegen (multiplexen) van enkele in golflengte verschillende signalen bij de verzender, waarna het totale signaal bij de ontvanger weer gesplitst (gedemultiplext) wordt in aparte signalen. Dit noemt men 'Wavelength Division Multiplexing' (WDM).

De mogelijkheden van dit systeem worden o.a. beperkt door de geringe selectiviteit van de demultiplexers. Dit maakt een dichte opstapeling van kanalen onmogelijk.

Een praktische realisatie van een dergelijk systeem is gedemonstreerd door Bulley (1987). 18 Kanalen van elk 1.5 Gb/s werden over 58 km verzonden.

De geïntegreerde optica heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan het tot stand komen van (de-)multiplexers. Passieve (de-)multiplexers zijn op Si-substraat gerealiseerd [bijv. Henry, C.H. (1988), Smit (1988), Toba (1988)]. Deze laatste wist een verrassend kleine kanaalafstand te bereiken (5 GHz), maar de verliezen en overspraak waren te groot.

#### 2.5 Dispersion-shifted en dispersion-flattened fibers

Voor de verhoging van de informatiedichtheid bestaat er naast WDM ook nog de mogelijkheid iets te doen aan de kleur-dispersie in de fiber. In een normale singlemode step-index glasvezel wordt de totale dispersie voornamelijk veroorzaakt door de materiaal-dispersie.

Er is echter ook nog een andere bijdrage aan de dispersie, nl. de waveguide dispersie. Dit is een vorm van dispersie die veroorzaakt wordt door het feit dat optische mode-profielen in de fiber van vorm veranderen als de golflengte verandert. Dit heeft een snelheidsverschil tussen de verschillende golflengtes tot gevolg dat onafhankelijk is van de intrinsieke materiaaleigenschappen van de fiber. In een normale step-index fiber zorgt dit effect voor een kleine verschuiving van het dispersieminimum.

Het blijkt nu dat de waveguide dispersie de materiaal dispersie kan compenseren door op de juiste manier het brekingsindexprofiel van de fiber te kiezen. Zo is men erin geslaagd het dispersie minimum van 1.3  $\mu\text{m}$  naar 1.55  $\mu\text{m}$  te verschuiven. Dit noemt men dispersion-shifted fibers.

Zeer recentelijk is men erin geslaagd op deze wijze het experiment van Gnauck (1987) te verbeteren [Fujita (1989)]. In het experiment van Fujita werd 10 Gb/s over 100 km verzonden. Interessant is dat hier gebruik gemaakt werd van een Multiple Quantum Well DFB-laser, die direct gemoduleerd kon worden zonder last te hebben van chirping.

In een verdere ontwikkeling bleek het mogelijk om de waveguide dispersie bij meerdere golflengten de materiaal dispersie te laten compenseren ( $D \leq 2$  psec/km.nm). De dispersiekromme loopt in deze zgn. dispersion-flattened fiber praktisch vlak over het gebied van 1.3 tot 1.6  $\mu\text{m}$ . Naast een mogelijke toename van de informatiedichtheid bij 1.55  $\mu\text{m}$  geven deze fibers ook de mogelijkheid om over een groter gebied meerdere kanalen door de fiber te sturen (WDM).

#### 2.6 Pre-chirping van het lasersignaal

Zeer recentelijk is er nog een nieuwe methode bedacht om de informatiedichtheid in de fiber op te voeren. Het blijkt mogelijk het uitgangssignaal van de laserdiode (of het uitgangssignaal van de externe modulator) d.m.v. een zgn. optische amplifier te 'pre-chirpen'. Dit houdt in dat men voordat het signaal de fiber in gaat de puls heeft vervormd. De vervorming van de puls in de optische amplifier wordt veroorzaakt door het feit dat de versterking van het optische signaal niet lineair is bij hoge gain. Dit zorgt voor een lijnverbreding in het frequentiedomein ('self phase modulation') zonder de pulsvorm al te veel aan te tasten. Het effect is dat zo de dispersie na een vaste afstand precies wordt gecompenseerd. Dit effect is recentelijk in de praktijk aangetoond [Olsson (1989)]. Men was in staat 16 Gb/s over 70 km te verzenden. Deze afstand is bijna vier keer zoveel als de grens voor het traditionele systeem.

### 3 COHERENTE OPTISCHE COMMUNICATIE

In dit hoofdstuk worden coherente optische communicatie systemen beschreven, de componenten toegelicht en wordt de belangrijke rol die de geïntegreerde optica in deze detectietechniek speelt aangeduid.

#### 3.1 Coherente communicatie

Naast de systemen die gebruik maken van directe detectie van het in intensiteit gemoduleerde optische signaal bestaat er ook een detectietechniek die meer gebruik maakt van het golfkarakter van licht: de zgn. coherente detectie.

Coherente detectie is een detectietechniek die al heel lang bekend is uit de ontvangst van radiosignalen. Bij de ontvangst van optische signalen d.m.v. glasfibers is het echter de laatste ontwikkeling. Men noemt deze techniek daarom ook wel de vierde generatie van optische communicatie.

Ontwikkelingen als de singlemode glasvezel en de singlemode (externe cavity) halfgeleider laser hebben optische coherente detectie van een door een glasvezel getransporteerd signaal mogelijk gemaakt. Door zijn verbeterde S/N verhouding (hetgeen reeds in 1967 voor optische systemen werd bevestigd [Goodwin]) is coherente detectie ideaal om de transmissie-afstand toe te laten nemen. Coherente detectie heeft verder voordelen als een hoge frequentie selectiviteit, hetgeen een zeer dichte stapeling van kanalen mogelijk maakt, en de interessante mogelijkheid om de dispersie in de glasvezel elektronisch te compenseren. Dit geeft coherente detectie de mogelijkheid directe detectie systemen te verdringen.

Een niet te onderschatten voordeel van coherente detectie is verder dat het door de dichte kanaalstapeling mogelijk wordt veel informatie over te brengen zonder dat er dure hoogfrequent apparatuur aanwezig hoeft te zijn om het signaal te verwerken. Vooral voor optische aansluitingen naar een gebruiker thuis is dit van belang (locale net).



## 3.2 Coherente detectie

In essentie bestaat coherente detectie uit het mengen van een zwak bij de ontvanger binnenkomend signaal met een sterke locale bron, de locale oscillator. Het te detecteren signaal wordt zo in intensiteit opgevoerd zonder de informatie in het binnenkomende signaal te verliezen (zie fig. 3.2.1). Wiskundig komt dit neer op een sommatie van twee sinussen, die na kwadrateren vermenigvuldigd wordt met een low pass filter van de detector.

$$E_{in} = E_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi) \quad (3.2.1.)$$

$$E_{lo} = E_2 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (E_1 \ll E_2) \quad (3.2.2.)$$

$$I_{det} = (E_{in} + E_{lo})^2_{lp} = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos((\omega_1 - \omega_2) \cdot t + \varphi) \quad (3.2.3.)$$

lp = low pass

In coherente technieken onderscheidt men homodyne en heterodyne detectie. In het eerste geval is de zendfrequentie identiek aan de frequentie van de locale oscillator ( $\omega_1 = \omega_2$ ), in het tweede geval niet ( $\omega_1 \neq \omega_2$ ). Het is duidelijk dat het detectieniveau ongeveer een factor  $E_2/E_1$  is verhoogd. De gevoeligheid van de detector speelt in dit geval geen rol meer, maar wel de hagelruis. De informatie kan op verschillende manieren aan het optische signaal worden toegevoegd worden. Men onderscheidt fase-, frequentie- en amplitude-modulatie (resp. PSK, FSK en ASK). Dit in tegenstelling tot directe detectie waar alleen amplitude-modulatie mogelijk is.

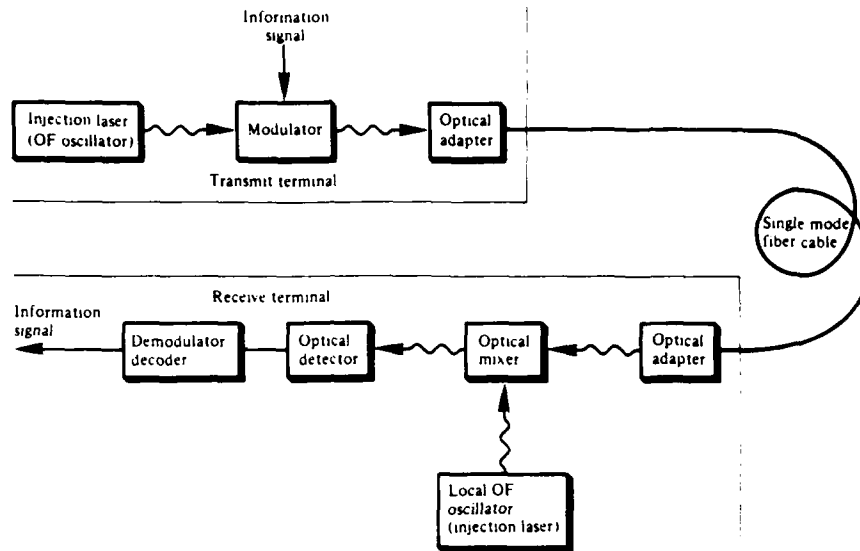


Fig. 3.2.1 Principe schets van een coherent optisch communicatie systeem [Senior (1985)]

### 3.3 Modulatieschema's

#### 3.3.1 Gevoeligheid

De verschillende modulatieschema's hebben sterk uiteenlopende gevoeligheden. Het meest gevoelige systeem is homodyne fase-modulatie. Voor een bitperiode  $T$  is het verschil tussen 'aan' en 'uit' gelijk aan  $4E_1E_2T$ , overeenkomend met  $\varphi = 0$  of  $\pi$ . Echter, wat gedetecteerd wordt heeft een Poisson-verdeling rond 'aan' en 'uit' met een breedte van  $\sqrt{\text{'aan'}}$  en  $\sqrt{\text{'uit'}}$ . Er is dus altijd een kans dat 'aan' als 'uit' geïnterpreteerd wordt. Voor een  $\text{BER} = 10^{-9}$  geldt  $E_1^2 \cdot T = 9$  als detectiegrens. Dit zijn 9 photoelectronen of voor een ideale detector 9 photonen.

Voor homodyne amplitude-modulatie is de detectiegrens 18 photonen, zodat zo'n systeem 3 dB ongevoeliger is [Miller (1988)].

Homodyne ontvangers hebben het nadeel dat de fase van het binnenkomende signaal gelijk moet zijn aan de fase van de locale oscillator. Hiervoor is een optische 'phase locked loop' nodig, die moeilijk te maken is. Heterodyne detectie kent dit probleem niet, omdat verschillende frequenties niet in fase blijven. Dit zorgt echter wel voor een fundamenteel verlies in de gevoeligheid van 3 dB. De gevoeligheden van heterodyne detectiesystemen zijn moeilijk te berekenen. Het resultaat echter staat in fig. 3.3.1.

TABLE I

MODULATION FORMAT	CLASS OF DETECTION	RECEIVER SYSTEM	OPTICAL LOCAL OSCILLATOR	IF/BASEBAND PROCESSING	PRACTICAL RELATIVE SENSITIVITY PENALTY (Received Mean Power)	SYSTEM LINEWIDTH- BIT RATE RATIO
PSK	Synchronous	Homodyne (Ideal)	Phase locked to suppressed carrier	-	0	
		Homodyne	Carrier Phase- locked loop (reduced carrier)	-	-1 dB	$6 \times 10^{-6}$ [17]
			Decision-driven Phase-locked loop (suppressed carrier)	-	-1 dB	$3 \times 10^{-4}$ [18]
			Costas Phase-locked loop (suppressed carrier)	-	-1 dB	$5 \times 10^{-4}$ [20]
		Heterodyne	Frequency Locked	Phase Locked	+3 dB	$5 \times 10^{-3}$
DS-SS	Synchronous	Homodyne				
QPSK	Non-synchronous	Heterodyne/ Phase Diversity	Frequency Locked	Delay Line + Multiplier	+4 dB	$3 \times 10^{-3}$ [14]
FSK	Non-synchronous	Heterodyne/ Phase Diversity	Frequency Locked	Discriminator	+7 dB	$1.8 \times 10^{-2} - 7.5 \times 10^{-2}$
				Dual Filter/ Envelope	+6 dB	$2.5 \times 10^{-2} - 0.1$
				Single Filter/ Envelope	+9 dB	0.1
ASK	Synchronous	Homodyne	Phase Locked	-	-3 dB	
	Non-synchronous	Heterodyne	Frequency Locked	- Phase Lock	-6 dB	
	Non-synchronous	Heterodyne/ Phase Diversity	Frequency Locked	Envelope	+6 dB	0.1

Fig. 3.3.1 Overzicht van de verschillende detectieschema's voor  
coherente communicatie [Davis (1985)]

Voor het elektronische gedeelte van de ontvanger onderscheidt men synchrone en asynchrone detectie. Een homodyne ontvanger moet gebruik maken van synchrone detectie, terwijl een heterodyne ontvanger dat niet hoeft. Hoewel synchrone detectieschema's gevoeliger zijn, zijn zij i.h.a. moeilijker te maken. In fig. 3.3.1 zijn de verschillende detectiesystemen samengevat.

### 3.3.2 Lijnbreedte van de laser

Een eindige lijnbreedte van de zendlaser en de locale oscillator zorgt voor een faseruis op het signaal. Dit heeft als gevolg dat de gevoeligheid achteruit gaat. Deze degradatie blijkt afhankelijk te zijn van de verhouding tussen de laser-lijnbreedte en de bitrate. Dus hoe hoger de bitrate des te groter mag de lijnbreedte van de laser zijn. Voor homodyne fase-modulatie schema's gelden de strengste eisen voor die lijnbreedte.

### 3.4 Phase-diversity detectie

Voor fase-aanpassing tussen de locale oscillator en het bij de ontvanger binnenkomende signaal is bij homodyne detectie een actieve fase-controller nodig om de signaalsterkte constant te houden. Dit regelsysteem is niet eenvoudig. Een alternatief wordt geboden door de 'phase-diversity' techniek [Davis (1985)].

Phase-diversity houdt in dat het binnenkomende signaal (homodyne) gemengd wordt met meerdere in fase verschoven signalen van de locale oscillator. Deze signalen worden allen apart gedetecteerd. Dit zorgt ervoor dat er t.g.v. de faseruis hooguit één kanaal wordt uitdooft. Het na de detector samengevoegde elektrische signaal is zo onafhankelijk van de faseruis geworden.

De nadelen van het phase-diversity concept zijn de complexere ontvanger en een met 3 dB afgenomen gevoeligheid. Naast het feit dat er geen fasecontrole nodig is, is er het grote voordeel van de betrekkelijk grote

lijnbreedte tolerantie (tot 10 % van de bitrate) van de laser. Standaard DFB-lasers zijn dus al snel geschikt.

Voor het samenvoegen van de in fase verschoven signalen in een phase-diversity ontvanger is de geïntegreerde optica de aangewezen techniek. Reeds zijn acht-poorts 90°-hybrids in  $\text{LiNbO}_3$  gerealiseerd [Hoffmann (1989)]. Het is echter niet nodig deze circuits uit een elektro-optisch materiaal zoals  $\text{LiNbO}_3$  te maken. Ook passieve optische circuits in bijv.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zijn hiervoor geschikt. De TU-Delft werkt in samenwerking met de TU-Eindhoven aan een dergelijk component.

### 3.5 Polarisatie controle

Tot nu toe is niet gesproken over de polarisatie van het bij de coherente ontvanger binnenkomende signaal. Coherente detectie is echter alleen mogelijk als de polarisaties van de twee te mengen signalen identiek zijn. Een uit een glasvezel komend signaal heeft een willekeurige polarisatie, die bovendien nog langzaam varieert in de tijd. De locale oscillator heeft echter een vaste TE-polarisatie. Daarom moeten er maatregelen getroffen worden. Er zijn een aantal mogelijkheden om dit probleem op te lossen.

Ten eerste is het mogelijk om de polarisatie van de locale oscillator continu aan te passen aan de binnenkomende polarisatie. Hiervoor is dus een regelbare polarisatie-draaier nodig, die d.m.v. een feedback-systeem gestuurd wordt. Geïntegreerd optisch betekent dit een electro-optische polarisatie-draaier [Alferness (1980)]. In Nederland ontwikkeld de TU-Delft in samenwerking met het RNL zo'n component.

Een tweede oplossing is een 'polarisation-switching' techniek [Habbab (1988)]. Hierbij wordt half in het bit de polarisatie van de locale oscillator omgedraaid. Er is dan geen kans dat er niets gedetecteerd wordt. Wel is de gevoeligheid 3 dB gedaald. In dit systeem is er geen feedback systeem nodig, maar er moet wel een frequentie generator bij de ontvanger aanwezig zijn.

De meest elegante oplossing is echter de 'polarisation-diversity' techniek [Okishi (1983)]. De polarisatie van de locale oscillator wordt 45°

gedraaid en vervolgens in een polarisatie-splitter gescheiden. Deze signalen worden apart met gesplitste binnenkomende signalen gemengd. Pas elektronisch worden de signalen samengevoegd. Wegens de behoefte aan een geïntegreerd optisch mengcircuit is deze techniek ideaal te combineren met de phase diversity techniek. Het geheel (phase- en polarisation-diversity) kan in één geïntegreerd optisch circuit worden gerealiseerd. Samen met een geïntegreerde locale oscillator ontstaat zo een geïntegreerd optische coherente ontvanger.

Los van de geïntegreerd optische oplossingen voor het polarisatie probleem bestaat er ook nog de mogelijkheid de polarisatie in de fiber te fixeren. Deze speciale 'Polarisation Maintaining Fibers' zijn zo ontworpen dat de het brekingsindex profiel niet meer rotatieinvariant is. Zo ontstaan er twee propagatiesnelheden in de fiber die amper koppeling vertonen [Ramaswamy (1978)]. Op deze manier komt er steeds een voorspelbare polarisatie aan bij het ontvangstcircuit. De verliezen die optreden om een signaal met een onvoorspelbare polarisatie te detecteren vervallen. Mocht men erin slagen deze fibers goedkoop en met goede eigenschappen te produceren, dan is het waarschijnlijk dat ze de normale step-index fiber in coherente systemen zullen verdringen.

### 3.6 Electronische compensatie van de fiberdispersie

Coherente systemen hebben in tegenstelling tot directe detectie systemen de mogelijkheid de fiberdispersie elektronisch te compenseren. Omdat de locale oscillator het gemoduleerde optische signaal 'afbeeldt' in een elektronisch te detecteren bereik wordt ook het 'time delay', veroorzaakt door de fiberdispersie, mee getransformeerd. Elektronisch is zo'n delay echter te compenseren (puls compressie). In de praktijk is dit toegepast door Iwashita (1988). In dit experiment werd 4 Gb/sec over 202 km door een normale step-index fiber verzonden.

### 3.7 Frequency division multiplexing

Enkel het feit dat een coherent optisch systeem gevoeliger is dan een systeem dat gebaseerd is op directe detectie maakt het niet persé aantrekkelijker. Het is juist de hoge frequentie selectiviteit waardoor coherente systemen voor enkele toepassingen veruit te preferen zijn boven directe detectie. In tegenstelling tot directe detectie systemen, die (de-) multiplexers nodig hebben voor meerkanaals systemen, kan coherente detectie gebruik maken van een frequentie selectieve locale oscillator.

Door de locale oscillator in frequentie te verschuiven is het mogelijk om aan de ontvanger kant een kanaal te selecteren. Daardoor kan de kanaalafstand veel kleiner gemaakt worden dan bij WDM (typisch 10 keer de bitrate tegen 1000 keer bij directe detectie). Dit zorgt ervoor dat in de band van lage damping rond  $1.55 \mu\text{m}$  zeer veel kanalen met betrekkelijk lage bitrate (enkele honderden MHz) kan bevatten, zodat de totale bandbreedte hoog blijft zonder de noodzaak voor dure hoog frequent apparatuur en elektronische demultiplexers. Dit kostenaspect zal voornamelijk een rol spelen bij een eventueel B-ISDN voor korte afstanden naar de gebruiker thuis. Voor trunk-transmissie over lange afstanden is dit van minder belang.

Een vereiste voor een meerkanaals coherent systeem is echter dat de locale oscillator laser niet alleen smalbandig moet zijn (zie 3.3.2), maar bovendien afstembaar moet zijn over een zo groot mogelijk gebied.

### 3.8 Lasers voor coherente detectie

Lasers in coherente optische communicatie systemen moeten aan belangrijke eisen voldoen. Ze moeten smalbandig en over een breed gebied afstembaar zijn. Dit laatste alleen voor meerkanaals systemen.

De lijnbreedte in een singlemode halfgeleider-laser wordt bepaald door de 'optische buffer' die de laser heeft voor incoherent gegenereerd licht (spontane emissie). Dit incoherente licht geeft een willekeurige bijdrage aan de fase, waardoor de lijnverbreding ontstaat [Henry (1982)].

De 'optische buffer' kan men op een aantal verschillende manieren vergroten.

### 3.8.1 Monolithische (externe cavity) lasers

Monolithische singlemode lasers hebben allen een frequentie-selectief tralie op of naast de actieve laag (DFB- of DBR-lasers). De lijnbreedte van dergelijke lasers kan grof gezegd verlaagd worden door de verhouding inhoud actieve laag/cavity lengte te verlagen. Dit kan door de actieve laag dunner te maken [Kondo (1989)] of door het gebruik van Quantum Wells [Takano (1989)]. Een tweede mogelijkheid is de actieve laag te koppelen aan een niet actieve golfgeleider (twinguide structuur). In deze structuur is de actieve laag vlak boven een niet absorberende golfgeleidende laag aangebracht. Het in de actieve laag gegenereerde licht koppelt met de onderliggende laag. Op deze wijze is een lijnbreedte van 900 kHz bereikt met een trilhoute van 1.5 mm lang [Fujita (1985)].

Het idee van de twinguide-structuur maakte goede afstembare monolithisch geïntegreerde lasers mogelijk. Immers, de 'passieve' geïntegreerde golfgeleider bestaat uit III-V materiaal, dat een brekingsindex heeft die afhankelijk is van de door de laag lopende elektrische stroom. Zo ontstond de drie sectie laser [Tohmori (1986)], zie fig. 3.8.1).

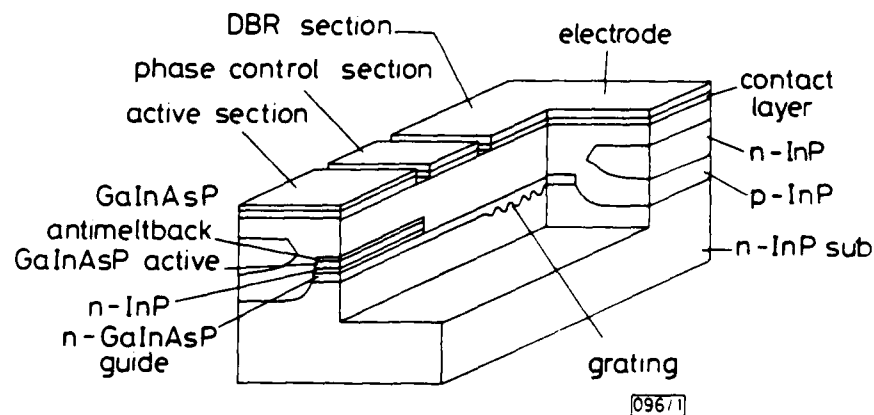


Fig. 3.8.1 Principe schets van een afstembare drie sectie laser [Kotaki (1988)]



Eén sectie is bedoeld voor de generatie van licht (actieve laag), één sectie voor het verstemmen van het DBR-tralie en een derde sectie is bedoeld om de totale optische lengte van de trilholte aan te passen. Op deze wijze is men erin geslaagd een laser te maken die over 720 GHz afstembaar is met een lijnbreedte van 23-77 Mhz [Murata (1987)].

### 3.8.2 Hybrid geïntegreerde externe cavity lasers

In plaats van een monolithisch geïntegreerde externe cavity laser is het ook mogelijk een laser te koppelen aan een passief optisch circuit gemaakt van een ander materiaal. Een groot voordeel hiervan is dat door de lagere brekingsindex van bijv. glas-golfgeleiders de eisen voor de lithografie aanzienlijk reduceren. Hammer (1985) toonde aan dat een normale Fabry-Perot laserdiode singlemode wordt wanneer deze aan een externe Bragg-reflector wordt gekoppeld. Door i.p.v. een Bragg-reflector een zgn. Resonante Optische Reflector te gebruiken [zie fig. 3.8.2, Olsson (1987)] is men erin geslaagd de lijnbreedte tot 135 kHz terug te brengen, genoeg voor vele toepassingen in de coherente communicatie.

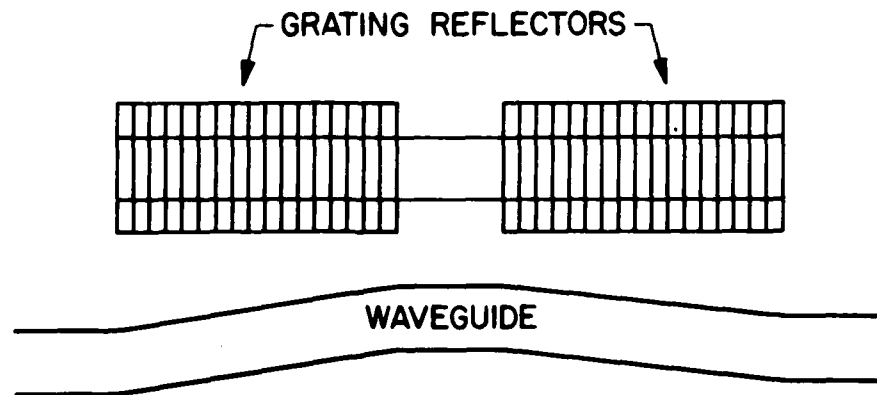


Fig. 3.8.2 Schematisch beeld van de resonante optische reflector [Olsson (1987)]. Met een dergelijke structuur is een laser gemaakt met een lijnbreedte van 135 kHz

Deze laserstructuren zijn nog niet afstembaar, maar het is waarschijnlijk dat door het gebruik van Electro-optische materialen als externe reflector, zoals bepaalde polymeren en  $\text{LiNbO}_3$ , dit soort hybride lasers in belang zal toenemen. De geïntegreerde optica beslaat dit terrein.

### 3.8.3 Bulk externe cavity lasers

Voor zeer smalle lijnbreedten is men aangewezen op de bulk externe cavity laser. Deze laser bestaat uit een éézijdig ontspiegelde FP-laserdiode, die licht gereflecteerd krijgt van een enige centimeters verder geplaatst diffractie-tralie. Op deze manier zijn lijnbreedten kleiner dan 1 kHz bereikt [Whyatt (1985)]. Voor praktisch alle coherente modulatieschema's is een lijnbreedte < 100 kHz voldoende. In compacte vorm zijn dergelijke lasers reeds gerealiseerd [zie fig. 3.8.3, Mellis (1988)].

Naast de smalle lijnbreedte hebben deze lasers de eigenschap dat ze over een zeer groot bereik afstembaar zijn. Door het diffractie-tralie d.m.v. stelschroeven gecombineerd te transleren en te roteren kon de laser van Mellis over 50 nm versteld worden (1510-1560 nm). Piezo's zorgden voor een fijninstelling met een 'hopvrij' bereik van 50 GHz.

Voor een coherente ontvanger zou een dergelijke laser met een glasvezel aan de ontvangstchip gekoppeld moeten worden.

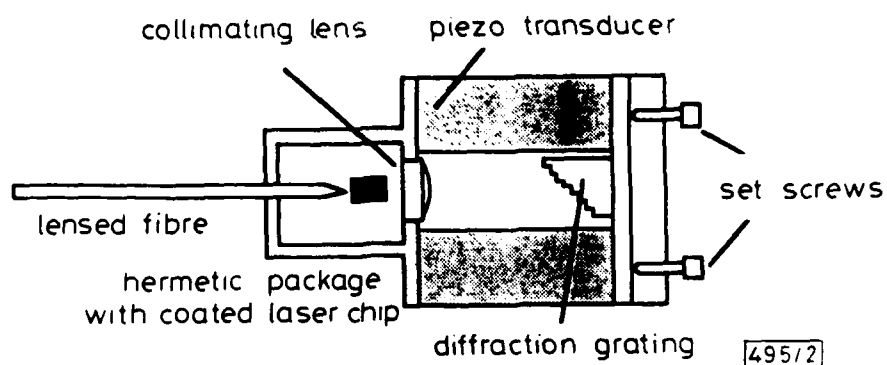


Fig. 3.8.3 Schematisch beeld en foto van een geminiaturiseerde externe cavity laser. Deze laser is mechanisch over 50 nm en electrisch over 50 GHz afstembaar. De lijnbreedte is 50 kHz [Mellis (1988)]

## 4 COMMERCELE SYSTEMEN

In dit hoofdstuk zullen enkele huidige en toekomstige commerciële toepassingen van optische communicatie ter sprake komen. Er zal op enkele plaatsen naar voren komen waar de geïntegreerde optica een bijdrage kan leveren.

## 4.1 Inleiding

De werkelijke toepassing van optische communicatie systemen is nog maar enkele jaren geleden begonnen. In het begin van de jaren tachtig werden de eerste telefoongesprekken in een eerste generatie systeem overgebracht. De ontwikkelingen zijn echter zeer snel gegaan en op het moment liggen reeds miljoenen kilometers glasvezel (met een sterk toenemend aandeel singlemode) in de grond. Dit betreft voornamelijk 'Trunk-transmissie' tussen telefooncentrales (Time Division Multiplexed). Naar verwachting zal de volgende doorbraak plaats vinden in het locale net, de transmissielijnen naar de gebruiker thuis. De bedoeling is dat hiervoor een breedbandig multi-functioneel datanet ontworpen wordt, waar zowel telefoongesprekken, computerdata als televisiesignalen digitaal mee worden overgebracht. Dit noemt men het B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network). Vooral door het aandeel van gedigitaliseerde (High Definition) televisiesignalen zal de bandbreedte vele GHz'n moeten bedragen. Vele miljarden guldens zullen met de aanleg van een dergelijk net gemoeid zijn.

Andere toepassingen van optische transmissielijnen kunnen bijv. snelle computerlinks of 'Local Area Networks' zijn.

## 4.2 'Interoffice'-systemen

Het eerste op grote schaal toegepaste optische communicatie systeem werd in 1983 in de Verenigde Staten aangelegd. Het bestaat uit 80.000 km multimode glasvezel met een bandbreedte van 90 Mb/s (~1000 TDM telefoongesprekken) op 0.8  $\mu$ m. Dit systeem verbindt centrales over korte afstanden (typisch 10 km). De kosten van een dergelijk systeem zitten niet

zozeer in de kabel en de eventuele repeaters, maar in de electronica (zoals (de-)multiplexers en schakelaars) in de centrales. Men doet daarom veel onderzoek om in dergelijke systemen vele functies optisch i.p.v. electronisch te vervullen. De geïntegreerde optica (bijv. in  $\text{LiNbO}_3$ ) zal uiteindelijk deze functies overnemen.

#### 4.3 'Intercity'-systemen

Een intercity optische kabel verbindt centrales, die over enkele honderden kilometers van elkaar verwijderd zijn. De kosten in zulke systemen worden niet meer bepaald door de centrales, maar door de dure repeaters die het zwakke optische signal weer moeten regenereren. Momenteel moet dit nog electronisch gedetecteerd en versterkt worden. Het is aantrekkelijk om dit optisch te doen. Een mogelijke optie om dit te realiseren is de optische amplifier (zie 2.6), die in principe in staat is de dispersie in de glasvezel te compenseren. Toegepaste intercity-systemen zijn tweede generatie systemen. Ze werken momenteel op ~40 Mb/s.

#### 4.4 Transatlantische systemen

Zeer recentelijk is een eerste transatlantische optische kabel in gebruik genomen (dec. '88). Deze 'TAT-8' is een tweede generatie systeem. De belangrijkste factor in dergelijke systemen is de betrouwbaarheid. Het is goed mogelijk dat dergelijke kabels sateliet verkeer zullen vervangen.

#### 4.5 Local Area Networks (LAN)

Naar verwachting zullen steeds meer locale kringstructuren tussen terminals en/of computers optisch worden verbonden. Commerciële verkrijgbare systemen werken momenteel op ~10 Mb/s (IBM). Het probleem in dergelijke structuren is dat elke gebruiker in de kring het signaal detecteerd, bekijkt en dan pas weer doorzendt. De snelheid van de kring wordt dus lager naarmate er meer gebruikers zijn! Er wordt onderzoek gedaan of er geïntegreerd optische componenten te maken zijn die het optische signaal

af kunnen tappen zonder de datastroom te blokkeren (PTT). In LAN's is de rol van eerste generatie systemen het meest waarschijnlijk.

#### 4.6 ISDN en B-ISDN

Binnen enkele jaren zal er (ook in Nederland) het digitale ISDN worden aangelegd. Dit bestaat waarschijnlijk uit enkele kanalen voor digitaal telefoon en dataverkeer. Deze kanalen zullen op 64 kb/s werken. Nieuw is dat de gebruiker ook zal kunnen verzenden zodat 'snel' dataverkeer tussen bijv. bedrijven mogelijk wordt. Dit net zal nog niet uit glasvezels bestaan.

Voor de verdere toekomst is echter het B-ISDN gepland. Hierin zullen diensten als Video-service, digitale (high definition) TV, toegang tot databanken e.d. geïntegreerd worden. De bandbreedte van een dergelijk systeem zal vele GHz'n moeten bedragen; dit vooral door de TV signalen. Dit net zal dus gedwongen uit optische singelmode glasvezel moeten bestaan. Om dure zeer hoog frequent apparatuur te vermijden gaat de gedachte uit naar een coherent meerkanaals systeem op ~500 MHz per kanaal. Dit systeem zal door zijn complexiteit enkel uit geïntegreerd optische componenten kunnen bestaan. De vele miljoenen gebruikers maken dit tot een commercieel interessant terrein.

## 5 GEINTEGREERDE OPTICA

In dit hoofdstuk zal samengevat worden op welke plaatsen in de optische communicatie de geïntegreerde optica een rol speelt en zal kunnen gaan spelen. Enkele nog niet eerder genoemde componenten zullen ter sprake komen.

## 5.1 Smalbandige lasers

Het onderzoek aan smalbandige verstembare halfgeleider-lasers is al in een ver gevorderd stadium. Voor directe detectie zijn er DBR-lasers, die extern gemoduleerd (met geïntegreerd optische modulatoren) tot hoge prestaties komen. De koppelverliezen tussen deze componenten moeten echter nog dalen. Hybrid of monolithisch geïntegreerde optica moet hier voor zorgen. Parallel hieraan wordt onderzoek gedaan naar laserstructuren die direct tot vele GHz'n gemoduleerd kunnen worden (Quantum Wells).

Interessanter zijn de afstembare lasers die nodig zijn voor coherente detectie. Naast verbeteringen in de monolithische 'drie-sectie laser' zullen er pogingen worden gedaan om hybrid geïntegreerde optische externe cavity lasers te produceren. Electro-optische polymeren of  $\text{LiNbO}_3$  zijn mogelijke kandidaten om dergelijke componenten te kunnen maken. Een voorwaarde is een goedkope en eenvoudige montage van de elementen.

## 5.2 Snelle modulatoren

Voor zowel directe als coherente detectie zijn snelle modulatoren nodig om de informatie aan het optische signaal toe te voegen. In  $\text{LiNbO}_3$  is reeds veel gerealiseerd. De EO-polymeren zijn nieuw en bieden nog mogelijkheden. Op het RNL (PTT) werkt men aan dergelijke modulatoren in door AKZO geleverde EO-polymeren. Ook op het FEL zullen dergelijke componenten gerealiseerd kunnen worden.

### 5.3 Polarisatiedraaiers

Voor coherente detectie moet de polarisatie van de locale oscillator aangepast moet worden aan het binnenkomende signaal. Actieve of 'passieve' polarisatiedraaiers voor o.a. 'polarisation-diversity' zijn hier voor nodig. Een electro-optisch materiaal is een vereiste. Het RNL werkt samen met de TU-Delft aan een polarisatiedraaier in  $\text{LiNbO}_3$ .

### 5.4 Optische isolatoren

Tot nu toe is het aspect van optische isolatie niet ter sprake gekomen. Halfgeleider-lasers hebben echter veel hinder van gereflecteerd licht. Dit gereflecteerde licht laat de intensiteits- en fase-ruis van de laser sterk toenemen, waardoor de prestaties sterk achteruit gaan. Daarom is het in optische communicatie systemen noodzakelijk om de laser te isoleren van andere optische componenten (van -40 tot -60 dB). Normaal gesproken (in bulk opstellingen) wordt hier het Faraday-effect voor gebruikt. Hiervoor zijn echter magnetische materialen nodig, die buitengewoon slecht geschikt zijn voor het maken van geïntegreerd optische componenten. Deze belangrijke 'bottle-neck' voor het realiseren van ingewikkelde geïntegreerd optische componenten als een zender of ontvanger voor bijv. coherente detectie is nog niet opgelost, hoewel de absolute noodzaak voor zo'n component bij enkele honderden MHz systemen nog niet vaststaat.

Het idee om een SAW-component te gebruiken als effectieve isolator lijkt de moeite waard om te bestuderen. Zeker omdat dit tot nu toe de enige methode lijkt, die te combineren is met planaire optische componenten. Het FEL onderzoekt momenteel of dit tot de mogelijkheden behoort.

### 5.5 Ontvanger voor coherente detectie

Voor een werkelijke toepassing van meerkanaals coherente detectie voor de gebruiker thuis (B-ISDN) is het noodzakelijk dat er een eenvoudige goedkope ontvanger wordt ontworpen. Zo'n ontvanger kan het eenvoudigste gerealiseerd worden met geïntegreerd optisch technieken. De vraag is



echter in hoeverre deze ontvanger werkelijk geïntegreerd moet worden en of dit monolithisch of hybrid moet gebeuren.

Een totale coherente ontvanger bestaat uit een locale oscillator laser (evt. met externe cavity), een polarisatiedraaier, een optisch mengcircuit (bestaande uit 3 dB koppelaars, bochten e.d.) voor bijv. phase/polarisation-diversity, detectoren, versterker electronica en evt. feed-back loops voor polarisatie of intensiteitscontrole. Evt. komt hier nog een optische isolator bij.

Het is goed mogelijk dat een aantal van deze componenten met een glasvezel aan de centrale chip zullen worden gekoppeld zonder 'totale integratie'. Het punt van goedkope, eenvoudige koppeling van een glasvezel aan een optisch circuit is dan ook vaak erg onderbelicht. De TPD/TNO heeft onderzoek verricht aan fiber koppeltechnieken.

Totale monolithische integratie van een dergelijke complexe ontvanger lijkt nog ver weg. De commercie zal uiteindelijk bepalen wanneer een systeem vereist is en wat men daar voor over heeft.

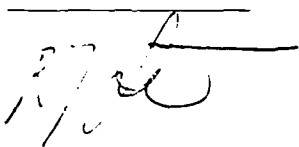
#### 5.6 Matrix schakelaars

In de huidige digitale telefooncentrales wordt het optisch binnenkomend signaal gedetecteerd, electronisch gedemultiplexed en geschakeld. Het moet in principe mogelijk zijn deze schakelfuncties geheel of gedeeltelijk optisch te verzorgen. Hiervoor is het nodig dat er schakelarrays worden ontworpen ( $N \times N$  schakelaars). Deze arrays zouden ook nodig kunnen zijn in breedbandige coherente systemen.

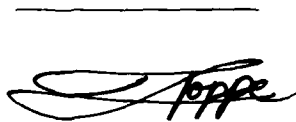
Het grote voordeel van optische schakelaars is dat ze onafhankelijk van de informatieinhoud kunnen schakelen. Dit in tegenstelling tot een hoogfrequent electronisch signaal. Er zijn ook schakelfuncties te bedenken, die ondanks de hoge informatie dichtheid in het signaal langzaam geschakeld mogen worden (bijv. het kiezen van een ander digitaal televisie signaal). De in samenwerking met het FEL door het RNL ontwikkelde thermo-optische schakelaar is hier een goed voorbeeld van.

## 5.7 Conclusie

Het zal duidelijk zijn dat de geïntegreerde optica een belangrijke rol speelt in de optische communicatie. Deze zal nog meer toenemen naarmate er nieuwe systemen en toepassingen worden geïntroduceerd. Het is echter niet eenvoudig te voorspellen welke componenten en systemen werkelijk op grote schaal toegepast zullen worden. De techniek ontwikkelt zich waarschijnlijk te snel om door de commercie bijgehouden te worden.



Drs. R.J.L. Lerou (plv. Groepsleider)



Drs. J.L. Joppe (Auteur)

REFERENTIES:

Alferness, R.C. en Buhl, L.L.  
Opt. Lett. 5, blz. 473 (1980)

Bulley, R.M. et al.  
Proc. of the 13th ECOC (1987)

Cohen, L.G. et al.  
IEEE J. Quantum Electr. QE-21, blz. 37 (1978)

Davis, A.W. et al.  
Journal of Lightwave Techn. JLT-5 (4), blz. 561 (1985)

Fujita, S. et al.  
Electr. Lett. 25 (11) blz. 702 (1989)

Fujita, T. et al.  
Electr. Lett. 21 (9), blz. (1985)

Gloge, D. en Marcatili, E.A.J.  
Bell Sys. Tech. Journal 52, blz. 1563 (1973)

Goodwin, F.E.  
IEEE Journal of Quantum Electr. QE-3 (11), blz. 524 (1967)

Habbab, I.M.I. en Cimini Jr., L.J.  
Journal of Lightwave Techn. JLT-6 (10), blz. 1537 (1988)

Hammer, J.M. et al.  
Appl. Phys. Lett. 47 (3), blz. 183 (1985)

Henry, C.H.  
IEEE Journal of Quantum Electr. QE-18 (2), blz. 259 (1982)

Henry, C.H. et al.  
Topical meeting on Int. and Guided Wave Opt. blz. 66 (1988)

Henry, P.S.  
IEEE Journal of Quantum Electr. QE-21, blz. 1862 (1985)

Hoffmann, D. et al.  
Journal of Lightwave Techn. JLT-7 (5), blz. 794 (1989)

Iwashita, K. en Takachio, N  
Electr. Lett. 24 (12), blz. 759 (1988)

Kao, K.C. en Hockham, G.A.  
Proc. IEE 113 (7), blz. 1151 (1966)

Kondo, Y. et al.  
Electr. Lett. 25 (3), blz. 177 (1989)

Korotky, S.K. en Alferness, R.C.  
Journal of Lightwave Tech. LT-1, blz. 244 (1983)

Kotaki, Y. et al.  
Electr. Lett. 23 (7), blz. 325 (1987)

Marcuse, D. en Lin, C.  
IEEE Journal of Quantum Electr. QE-17, blz. 869 (1981)

Mellis, J. et al.  
Electr. Lett. 24 (16), blz. 988 (1988)

Miller, S.E. en Kaminow, I.P.  
"Optical Fiber Communications II", Academic Press (1988)

Miya, T. et al.  
Electr. Lett. 15 (4), blz. 106 (1979)

Murata, S. et al.  
Electr. Lett. 23 (8), blz. 403 (1987)

Okoshi, T.  
Proc. IOOC'83 blz. 386 (juni 1983)

Olsson, N.A., Agrawal, G.P. en Wecht, K.W.  
Electr. Lett. 25(9), blz. 603 (1989)

Olsson, N.A. et al.  
Appl. Phys. Lett. 51 (15), blz. 1141 (1987)

Ramaswamy, V. et al.  
Appl. Phys. Lett. 33, blz. 814 (1978)

Senior, J.M.  
"Optical Fiber Communications", Prentice-Hall (1985)

Smit, M.K.  
Electr. Lett. 24 (7), blz. 385 (1988)

Stauffer, J.R.  
IEEE J. Sel. Areas Comm. SAC-1, blz. 413 (1983)

Stern, M. et al  
Optics Letters 11, blz. 584 (1986)

Takano, S. et al.  
Electr. Lett. 25 (5), blz. 357 (1989)

Toba, H et al.  
Electr. Lett. 24 (2), blz. 78 (1988)

Tohmori, Y. et al.  
Electr. Lett. 22 (8), blz. 138 (1986)

Tsang, W.A. et al.  
Appl. Phys. Lett. 42, blz. 650 (1983)

Whyatt, R. en Devlin, W.J.  
Electr. Lett 19, blz 110 (1983)

Yamada, J.I. et al.  
IEEE Journal of Quantum Electr. QE-14, blz. 791 (1979)

Yamada, J.I. et al.  
Electr. Lett. 17, blz. 479 (1981)

Yamaguchi, M. et al.  
Electr. Lett. 23 (5), blz. 191 (1987)

## REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD-NL)

1. DEFENSE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD89-3572	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER FEL-89-B252
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 715.4	5. CONTRACT NUMBER	6. REPORT DATE SEPTEMBER 1989
7. NUMBER OF PAGES 39	8. NUMBER OF REFERENCES 40	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED FINAL REPORT
10. TITLE AND SUBTITLE DE ROL VAN DE GEINTEGREERDE OPTICA IN DE OPTISCHE COMMUNICATIE (APPLICATION OF INTEGRATED OPTICAL COMPONENTS IN OPTICAL FIBRE COMMUNICATION)		
11. AUTHOR(S) DRS. J.L. JOPPE		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO PHYSICS AND ELECTRONICS LABORATORY, P.O. BOX 96864, 2509 JG THE HAGUE, THE NETHERLANDS		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S)		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 POSITIONS) THE ADVANCE IN OPTICAL FIBRE COMMUNICATION HAS BEEN TREMENDOUS DURING THE LAST FEW YEARS. THE MAIN APPLICATIONS ARE TRUNK TRANSMISSION LINES FOR TELEPHONE CALLS. IN THE NEAR FUTURE THERE WILL BE A NEW APPLICATION OF OPTICAL COMMUNICATION IN THE LOCAL DISTRIBUTION NETWORK. IT IS EXPECTED THAT AT THE END OF THIS CENTURY THE SUBSCRIBER WILL BE CONNECTED WITH A BROADBAND INTEGRATED SERVICES DIGITAL NETWORK (B-ISDN). SYNCHRONOUS WITH THE DEVELOPMENTS IN OPTICAL COMMUNICATIONS INTEGRATED OPTICS ORIGINATED. INTEGRATED OPTICS, WHICH TRIES TO INTEGRATE AND MINITURISE OPTICAL COMPONENTS, IS ABLE TO SIMPLIFY AND IMPROVE SYSTEMS OF OPTICAL COMMUNICATION CONSIDERABLY.		
16. DESCRIPTORS  FIBRE OPTICS FIBRE COMMUNICATION INTEGRATED OPTICS		IDENTIFIERS
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)  UNCLASSIFIED	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)  UNCLASSIFIED	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)  UNCLASSIFIED
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT  UNLIMITED AVAILABILITY		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)  UNCLASSIFIED